

**EVALUASI KINERJA KOMUNIKASI CAHAYA TAMPAK ANTAR KAPAL SELAM
BAWAH LAUT MENGGUNAKAN MODULASI ON-OFF KEYING (OOK)
PERFORMANCE EVALUATION VISIBLE LIGHT COMMUNICATION FOR DEEP SEA
SUBMARINE WITH ON-OFF KEYING (OOK) MODULATION**

Dinda Aulia Noviana¹, Akhmad Hambali², Brian Pamukti³

^{1,2,3} Prodi S1 Teknik Telekomunikasi, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom

¹dindaaulianov@gmail.com ²ahambali@telkomuniversity.ac.id

³briantp@telkomuniversity.ac.id

Abstrak

Di masa sekarang, teknologi komunikasi telah berkembang dengan pesat, akhirnya berkomunikasi dapat dilakukan dengan mudah dalam kehidupan sehari-hari. Namun, berkomunikasi bukan sesuatu hal mudah untuk dilakukan oleh para penyelam atau kapal selam di bawah laut. Pada penelitian ini dimanfaatkan cahaya tampak atau *Visible Light Communication* (VLC) sebagai komunikasi nirkabel optik untuk menggantikan gelombang radio dan cahayanya dijadikan penerangan. Sistem komunikasi cahaya tampak bawah laut ini terdiri dari pemancar dengan cahaya yang dipancarkan berupa *Light Emitting Diode* (LED), cahaya yang ditransmisikan dirambatkan melewati kanal air laut dan cahaya tersebut ditangkap oleh *receiver* berupa *photodetector* jenis *Positive Intrinsic Negative* (PIN).

Sistem yang telah dirancang memiliki *output* berupa jarak terhadap daya terima, kualitas *Signal to Noise Ratio* (SNR) dan *Bit Error Rate* (BER) terhadap jarak. Pada penelitian ini, komunikasi cahaya tampak di bawah laut ini dapat dilakukan pada estimasi jarak 1 m sampai dengan 10 m pada kedalaman 5 m dan 10 m, dan 15 m dengan lampu LED array 2 dan memiliki daya 3 W di setiap lampu.

Kata kunci: *Visible Light Communication, Light Emitting Diode, photodetector.*

Abstract

Nowadays, communication technology has developed rapidly, so, communicate can be easily to do in everyday. But, communication is not something easy for divers or submarines to do in underwater. In this research, visible light or Visible Light Communication (VLC) is used as optical wireless communication to replace radio waves and the light can be used as lighting. This underwater visible light communication system consists of a transmitter with the light when transmitted through the channel ocean water, and the light caught with the receiver consist photodetector Positive Intrinsic Negative (PIN).

The system that has been designed has an output, such as the distance between receiving power, quality Signal to Noise Ratio (SNR) and Bit Error Rate (BER) between distance. In this research, communication of visible light under the sea can be done at an estimated distance of 1 m to 10 m at a depth of 5 m and 10 m, and 15 m with array LED with 2 lights and has a power with 3 W at each lamp.

Key words : *Visible Light Communication, Light Emitting Diode, photodetector.*

1. Pendahuluan

Di masa sekarang, teknologi komunikasi telah berkembang dengan pesat, akhirnya berkomunikasi dapat dilakukan dengan mudah dalam kehidupan sehari-hari. Namun, berkomunikasi bukan sesuatu hal mudah untuk dilakukan oleh penyelam atau kapal selam dibawah laut. Penyebabnya yaitu gelombang radio yang tidak dapat menembus air laut. Teknologi komunikasi tanpa kabel menjadi pilihan pertama dalam melakukan pertukaran informasi, khususnya untuk komunikasi antar kapal selam di bawah laut, seperti komunikasi nirkabel optik dengan teknologi *Visible Light Communication* (VLC). VLC atau komunikasi cahaya tampak merupakan teknologi komunikasi nirkabel optik yang memanfaatkan cahaya tampak sebagai sinyal pengirim informasi untuk menggantikan gelombang radio. Maka dari itu, komunikasi cahaya tampak dapat diaplikasikan di bawah air. Selain untuk menggantikan gelombang radio, cahaya yang dimanfaatkan sebagai sinyal pengirim informasi ini memiliki redaman relatif rendah terhadap air dan cahaya yang digunakan dapat dijadikan penerangan pada saat berada di bawah laut [3].

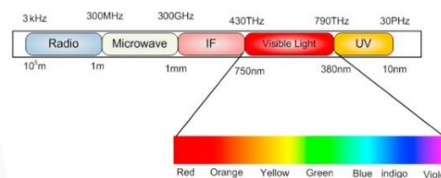
Selain komunikasi cahaya tampak dianggap sebagai teknologi yang dapat diandalkan, komunikasi cahaya tampak di bawah laut ini masih memiliki kekurangan, yakni cakupan yang

terbatas dan sensitivitas terhadap *Line of Sight* (LOS) [2]. Untuk mengatasi kekurangan tersebut, maka dibutuhkan teknologi untuk pertukaran informasi yang tepat dengan teknologi *Underwater Visible Light Communication* (UVLC). Teknologi UVLC memanfaatkan cahaya berupa *Light Emitting Diode* (LED) untuk sinyal pengirim informasi. Pada penelitian sebelumnya, telah dilakukan pengujian komunikasi antar penyelam dengan *Frequency Modulation* (FM) [4]. Namun, kendala yang terjadi pada penelitian sebelumnya terdapat ketidakefisien saat berkomunikasi dengan jarak komunikasi relatif jauh. Metode yang digunakan untuk evaluasi kinerja komunikasi cahaya tampak pada penelitian proposal tugas akhir ini ialah dengan modulasi *On-Off Keying* (OOK).

2. Dasar Teori

2.1. Visible Light Communication

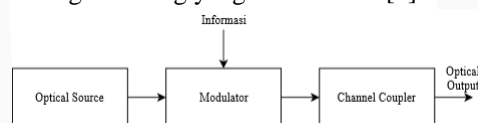
Visible Light Communication adalah teknologi komunikasi sistem nirkabel optik yang memanfaatkan cahaya tampak sebagai sinyal pengirim informasi. VLC memiliki panjang gelombang dengan rentang 380 nm - 780 nm dan spektrum frekuensi dengan rentang 430 THz - 790 THz seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Pada teknologi VLC terdiri dari pemancar berupa LED, media transmisi dan penerima berupa photodetector [5]. Dengan memanfaatkannya cahaya tampak sebagai pembawa informasi, cahaya tampak memiliki beberapa kelebihan. Kelebihan tersebut antara lain aman untuk manusia maupun biota laut ketika di bawah air karena tidak menghasilkan radiasi, dapat digunakan sebagai penerangan dan tidak ada interferensi elektromagnetik. Adapun kekurangan pada cahaya tampak, yakni area cakupan yang dijangkau LED terbatas [1].



Gambar 1. Spektrum VLC.

2.2. Transmitter

Transmitter atau pemancar optik merupakan alat yang berfungsi untuk mengubah sinyal listrik menjadi bentuk optik dan untuk mengirimkan sinyal optik berupa cahaya pada sistem komunikasi serat optik [6]. Terlihat pada Gambar 2 ditunjukkan sebuah pemancar yang terdiri dari *optical source*, modulator dan *channel coupler*. *Optical source* yang berupa LASER atau LED digunakan untuk mengirimkan sinyal optik yang dihasilkan dengan cara memodulasi gelombang pembawa optik. Modulator berfungsi sebagai tempat proses modulasi pada sinyal pembawa agar dapat ditumpangkan pada frekuensi dan dapat disalurkan. Channel coupler biasanya berupa mikrolensa yang berfungsi untuk menyalurkan gelombang yang termodulasi [6].



Gambar 2. Blok Diagram Transmitter.

2.3. Light Emitting Diode

LED merupakan komponen elektronika dengan berbahan semikonduktor yang berfungsi untuk mengemisi cahaya dari catuan arus yang diberikan. Prinsip emisi cahaya dari LED adalah emisi yang spontan. LED terdiri dari sambungan material semikonduktor tipe-p dan material semikonduktor tipe-n yang diberi tegangan bias maju [5]. Dengan fungsi LED sebagai sumber cahaya berupa cahaya tampak pada sistem VLC, LED dapat dijadikan penerangan dan komunikasi. Selain itu, LED memberikan banyak keuntungan seperti LED menghasilkan panas yang lebih kecil, sehingga listrik yang dibangkitkan sebagian besar langsung menghasilkan cahaya, keuntungan dalam segi keamanan dan bebas interferensi gelombang elektromagnetik [2].

2.4. Receiver

Receiver atau penerima optik memiliki peran yaitu perangkat aktif yang berfungsi untuk menerima sinyal informasi yang telah dikirim oleh transmitter [8]. Terlihat pada Gambar 3

ditunjukkan sebuah penerima optik yang terdiri dari *photodetector*, *amplifier* dan demodulator. *Photodetector* berfungsi sebagai sensor cahaya untuk mengubah sinyal optik berupa cahaya menjadi sinyal elektrik. *Amplifier* berfungsi sebagai penguat sinyal elektrik dari *photodetector*. Demodulator yaitu proses mendapatkan kembali informasi atau proses membaca informasi dari sinyal yang diterima dari pengirim [8].



Gambar 3. Blok Diagram Receiver.

2.5. Photodetector

Photodetector adalah jenis perangkat yang mengubah sinyal optik berupa cahaya menjadi sinyal listrik. *Photodetector* terdapat dua jenis, yaitu *photodetector Positive Intrinsic Negative (PIN)* dan *photodetector Avalanche Photo Diode (APD)*. Pada sistem komunikasi cahaya tampak bawah laut ini menggunakan *photodetector* berjenis PIN.

2.5.1 Photodetector PIN

Photodetector PIN terdiri dari bahan semikonduktor tipe p dan n [5]. Persyaratan yang harus ada dalam *photodetector* sistem komunikasi cahaya tampak sebagai berikut [8]:

- Tingkat responsivitas tinggi dalam panjang gelombang.
- Kecepatan respons yang memadai.
- Tingkat gangguan atau noise harus serendah mungkin untuk mengurangi pengaruh sinyal terhadap perangkat itu sendiri.
- Memiliki hubungan linier yang baik untuk memastikan tidak ada distorsi selama proses konversi sinyal.

2.6. Modulasi

Modulasi adalah sebuah proses menumpangkan sinyal informasi ke dalam sinyal pembawa (*carrier*). Dapat dinyatakan bahwa modulasi merupakan proses transmisi gelombang sinyal yang telah termodulasi dari *transmitter* ke *receiver*.

2.6.1 On-Off Keying

Dalam proses modulasi, OOK adalah bentuk modulasi yang paling sederhana. OOK biasanya digunakan dalam sistem komunikasi cahaya tampak sebagai sistem pengujian kinerjanya. Dalam skema *Non-Return-to-Zero (NRZ)*, saat pulsa bit "1" dinyatakan sebagai *low signal* dimana menempati seluruh interval, sedangkan pulsa saat bit "0" dinyatakan sebagai *high signal* dimana tidak dinyatakan dengan pulsa. Dalam skema *Return to-Zero (RZ)*, saat bit "1" menempati setengah interval bit pertama dan setengah interval bit kedua, sedangkan saat bit "0" dinyatakan sebagai tidak memiliki pulsa yang digunakan [8].

2.7 Kanal Transmisi

Kanal adalah media yang digunakan untuk menyalurkan data dari *transmitter* ke *receiver* pada suatu sistem komunikasi. Pada komunikasi bawah laut, kanal yang digunakan ialah air laut, yang di mana kanal air laut merupakan media transmisi sebagai sistem perambatan cahaya yang dikirimkan. Sebagian besar pada air laut terdiri dari air murni atau *pure ocean water* dan sisanya menjadi garam yang telah terlarut dengan konsentrasi yang diberikan [2]. Pada komunikasi cahaya tampak bawah laut, mempresentasikan informasi yang dikirim tidak ada penghalang dan *point-to-point* antara pemancar dan penerima, kanal yang digunakan antara lain *Line of Sight (LOS)*. Sistem LOS pada komunikasi cahaya tampak bawah laut menggunakan LED sebagai sumber dan *photodetector PIN* sebagai penerima yang dimana memiliki area yang luas. Distribusi sudut pada pola intensitas radiasi direpresentasikan dengan emisi lambertian yang didefinisikan dengan [2] :

$$m = \frac{-\log_{10}(2)}{\log_{10}(\cos\theta_{1/2})}, \quad (1)$$

dengan $\theta_{1/2}$ merupakan *Full Width Half Maximum (FWHM)*, maka kanal LOS dapat dirumuskan dengan :

$$H = \frac{(m+1) \cdot (\cos(\phi))^{m+1} \cdot A_R}{2 \cdot \pi \cdot d^2}, \quad (2)$$

dengan m merupakan emisi lambertian, A_R merupakan area *photodetector*, d adalah jarak antara *transmitter* dan *receiver* dan ϕ adalah sudut penerima LED.

2.8 Signal to Noise Rasio

SNR berfungsi untuk mengetahui noise yang mengganggu sinyal yang sedang ditransmisikan. Dimana sinyal yang mengalami gangguan akan mempengaruhi kualitas sinyalnya, kualitas sinyal yang diukur dengan satuan desibel (dB) [12]. Nilai SNR dapat dihitung dalam persamaan berikut [2] :

$$S/N = \frac{\frac{m^2 I_p^2 . M}{2}}{2q(I_p + I_D)BM^2 F(M) + 2qI_L B + \frac{2hc^2 \gamma AR(\pi.FOV)^2 \Delta \lambda T_A T_F + 4K_B T B}{\lambda^5 [e^{(hc/\lambda kT)} - 1]} \frac{1}{R_L}} \tag{3}$$

dengan m merupakan indeks modulasi, I_p merupakan arus primer, I_D merupakan arus *dark*, M merupakan multiplikasi dengan nilai ketetapan 1 pada tipe *photodetector* PIN, q merupakan muatan elektron dengan ketetapan 1.6×10^{-19} , B merupakan bandwidth, $F(M)$ merupakan *noise figure* dengan kelipatan 1 pada *photodetector* PIN, I_L merupakan arus bocor, K_B merupakan konstanta bloltzman dengan ketetapan 1.38×10^{-23} , T merupakan ekuivalen dari suhu *noise*, R_L merupakan muatan resistor, h merupakan konstanta planck dengan ketetapan 6.625×10^{-24} , c merupakan kecepatan cahaya air laut dengan ketetapan 2.25257×10^8 , γ merupakan faktor absorpsi radiasi dengan ketetapan 0.5, AR merupakan area *photodetector*, FOV merupakan *filled of view*, $\Delta \lambda$ merupakan *bandwidth* filter optik, T_A merupakan transmisi dalam air, T_F merupakan transmisivitas filter optik.

2.9 Bit Error Rate

Bit Error Rate (BER) merupakan perbandingan antara jumlah bit yang dikirimkan dengan jumlah bit yang error. BER bertujuan untuk menentukan ukuran kualitas sinyal dalam sistem komunikasi. Semakin kecil nilai BER yang didapat, maka semakin baik kondisi atau jaringan tersebut [12]. Adapun modulasi yang digunakan dalam modulasi ini adalah [5] :

1. Modulasi OOK-NRZ

Rumus BER dalam modulasi OOK-NRZ adalah:

$$BER_{OOK-NRZ} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{1}{2\sqrt{2}} \sqrt{S/N}\right), \tag{4}$$

2. Modulasi OOK-RZ

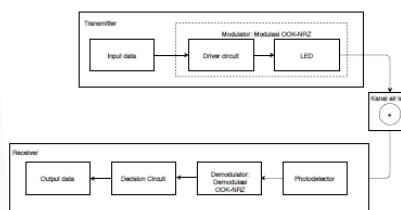
Rumus BER dalam modulasi OOK-RZ adalah:

$$BER_{OOK-RZ} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{1}{2} \sqrt{S/N}\right). \tag{5}$$

3. Perancangan dan Simulasi Sistem

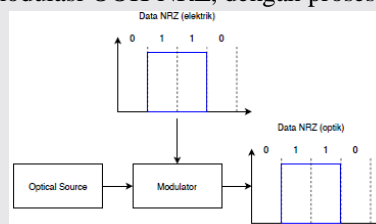
3.1 Blok Diagram Sistem

3.1.1 Blok Diagram OOK-NRZ



Gambar 4. Blok Diagram sistem VLC dengan modulasi OOK-NRZ.

Terlihat pada gambar 4, pada bagian pertama terdapat *input* data yang merupakan sekumpulan informasi berupa data maupun audio yang akan dikirimkan. Sinyal informasi yang dikirimkan akan ditumpangkan pada sinyal *carrier*. Pada proses penumpangan sinyal informasi, sinyal akan diproses dalam modulator menggunakan modulasi OOK-NRZ, dengan proses seperti gambar berikut.

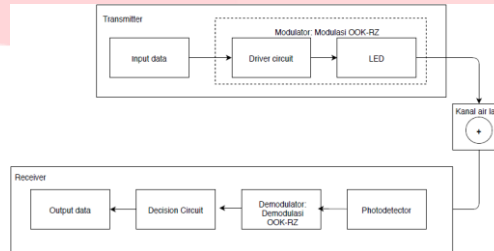


Gambar 5. Transmitter OOK-NRZ.

Blok *transmitter* menggunakan driver circuit untuk mengaktifkan LED beserta komponen di dalamnya dan mengubah sinyal input berupa pesan-pesan digital ke dalam bentuk lain, sehingga

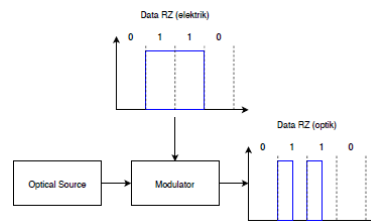
dapat ditransmisikan ke tujuan. Pada komponen LED akan memancarkan cahaya yang akan mentransmisikan sinyal yang termodulasi. Informasi yang telah dikirimkan berupa sinyal cahaya, akan mengenai bagian *photodetector* yang di mana akan terjadi pengkonversian dari sinyal optik berupa cahaya menjadi sinyal listrik. sinyal yang telah terkonversi akan masuk ke dalam demodulator, yang di mana perangkat ini berfungsi sebagai proses mendapatkan kembali sinyal informasi yang ditumpangkan dari sinyal yang diterima. Setelah itu, sinyal akan masuk ke *decision circuit*, yang di mana perangkat ini akan meloloskan sinyal daya melebihi batas *threshold* dan bit dianggap bernilai satu, sedangkan untuk sinyal daya yang tidak melebihi batas, bit dianggap bernilai nol. Untuk mengetahui tingkat kualitas sinyal, maka diperlukan adanya *BER Test*.

3.1.2 Blok Diagram OOK-RZ



Gambar 6. Blok Diagram sistem VLC dengan modulasi OOK-RZ.

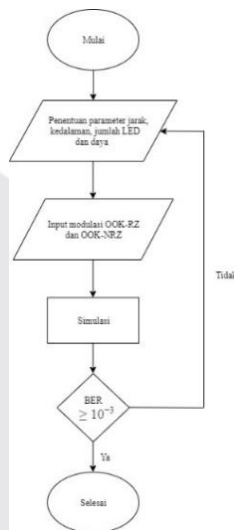
Terlihat pada gambar 6 merupakan sistem modulasi OOK-RZ. Secara garis besar blok diagram OOK-RZ sama seperti OOK-NRZ, terdiri dari *transmitter* dan *receiver*. Tetapi, yang membedakan ialah keluaran sinyal yang dipancarkan oleh LED. Pada proses penumpangan sinyal informasi, sinyal akan diproses dalam modulator menggunakan modulasi OOK-RZ, dengan proses seperti gambar berikut.



Gambar 7. Transmitter OOK-RZ.

3.2 Diagram Alur Sistem

Perancangan skenario pada sistem ini komunikasi cahaya tampak bawah laut ini di tunjukan pada Gambar 8. Tugas Akhir ini melakukan simulasi performansi cahaya tampak di bawah laut dengan menggunakan teknik modulasi OOK-NRZ dan OOK-RZ, simulasi tersebut menggunakan software MaLab.



Gambar 8 Diagram Alir Perancangan Sistem.

3.3 Desain Simulasi VLC Bawah Laut

Pada simulasi sistem Tugas Akhir ini, memfokuskan pada spesifikasi LED, kanal air laut, spesifikasi photodetector dan modulasi yang ditentukan.

3.3.1 Spesifikasi LED

LED yang digunakan pada tugas akhir ini menggunakan LED array 2 dengan daya sebesar 3 mW. Lampu LED tersebut diletakkan dibagian depan kapal selam.

3.3.2 Kanal Air Laut

Terdapat beberapa tipe air laut yakni *clear ocean* atau *pure sea water*, *coastel ocean water*, *turbid harbor*. Pada Tugas Akhir ini, simulasi sistem komunikasi cahaya tampak bawah laut memfokuskan pada tipe air laut *clear ocean* atau *pure sea water*, dimana merupakan tipe air laut yang jernih.

3.3.3 Spesifikasi Photodetector

Photodetector yang digunakan berjenis N-Type silicon PIN Photodetector. Tipe photodetector ini memiliki karakteristik dengan luas permukaan sebesar 1 cm^2 dan memiliki cakupan area sebesar 70° untuk *Field of View* (FOV) dan memiliki responsivitas 0.6 A/W .

4. Hasil dan Analisis

Bab ini menampilkan hasil simulasi yang telah dilakukan dan analisa hasil simulasi yang didapat. Penulis akan menampilkan hasil simulasi jarak dalam kinerja sistem komunikasi cahaya tampak. Hasil tersebut menggunakan jenis air laut bertipe *pure sea water* dengan estimasi jarak antar kapal selam sekitar 1 m - 10 m dan estimasi kedalaman sebesar 1 m, 5 m dan 10 m.

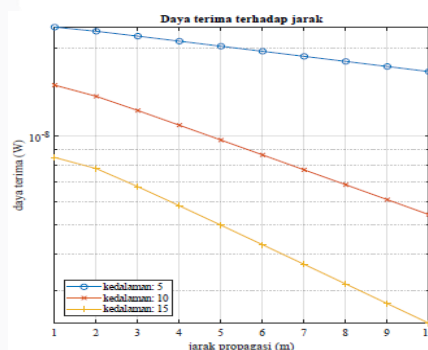
4.1 Analisis Daya Terima Terhadap Jarak

Pada skenario ini dilakukan analisis pengujian sistem daya terima terhadap jarak. Pendistribusian daya yang digunakan pada komunikasi cahaya tampak bawah laut menggunakan LED array 2 dengan masing-masing daya LED 3 W. Terlihat pada Tabel 1 merupakan hasil dari pengujian sistem daya terima terhadap jarak. Pada hasil tersebut terlihat bahwa semakin jauh jarak yang akan dipakai dalam berkomunikasi, semakin kecil daya yang diterima.

Tabel 1. Hasil Pengujian Nilai daya terima terhadap jarak.

Jarak		Kedalaman		
		5 m	10 m	15 m
Minimum	1 m	$2.347 \times 10^{-8} \text{ W}$	$1.492 \times 10^{-8} \text{ W}$	$8.48 \times 10^{-9} \text{ W}$
Maximum	10 m	$1.658 \times 10^{-8} \text{ W}$	$5.428 \times 10^{-9} \text{ W}$	$2.323 \times 10^{-9} \text{ W}$

Berikut adalah grafik yang ditunjukkan oleh Gambar 9 merepresentasikan hasil pengujian daya terima terhadap jarak:



Gambar 9. Grafik distribusi daya terhadap jarak.

4.2 Analisis Skenario Sistem 1 OOK-RZ

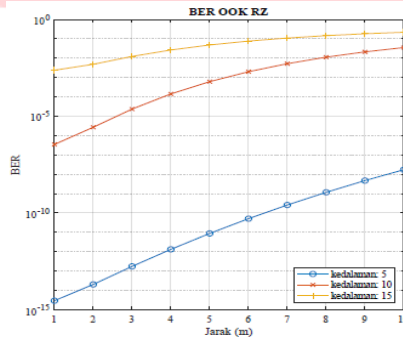
Pada skenario ini dilakukan analisis pengujian sistem nilai BER OOK-RZ yang di dapat dari daya terima akan di analisis dengan jarak antara *transmitter* dan *receiver*. Terlihat pada Tabel 2

merupakan hasil dari pengujian sistem nilai BER yang didapat dari daya terima. Pada hasil tersebut terlihat bahwa semakin jauh jarak antara pengirim dan penerima akan mempengaruhi nilai BER yang akan semakin buruk dan dapat dilihat dari angka tersebut.

Tabel 2. BER OOK-RZ terhadap jarak.

Jarak		Kedalaman		
		5 m	10 m	15 m
Minimum	1 m	2.906×10^{-15}	3.467×10^{-7}	2.391×10^{-3}
Maximum	10 m	1.715×10^{-8}	3.545×10^{-2}	2.198×10^{-1}

Berikut adalah grafik yang ditunjukkan oleh Gambar 10 merepresentasikan hasil pengujian skenario sistem 1 OOK-RZ:



Gambar 10. Grafik BER OOK-RZ.

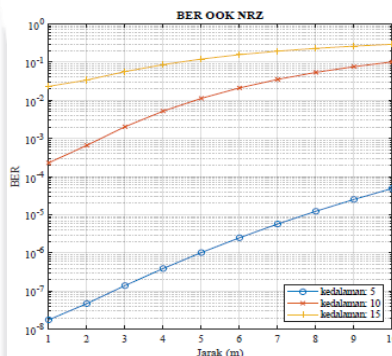
4.3 Analisis Skenario Sistem 2 OOK-NRZ

Pada skenario ini juga dilakukan analisis pengujian sistem nilai BER OOK-NRZ yang di dapat dari daya terima akan di analisis dengan jarak antara *transmitter* dan *receiver*. Terlihat pada Tabel 3 merupakan hasil dari pengujian sistem nilai BER yang didapat dari daya terima. Pada hasil tersebut terlihat bahwa semakin jauh jarak antara pengirim dan penerima akan mempengaruhi nilai BER yang akan semakin buruk dan dapat dilihat dari angka tersebut.

Tabel 3. BER OOK-NRZ terhadap jarak.

Jarak		Kedalaman		
		5 m	10 m	15 m
Minimum	1 m	1.77×10^{-8}	2.291×10^{-4}	2.319×10^{-2}
Maximum	10 m	4.896×10^{-5}	1.011×10^{-1}	2.926×10^{-1}

Berikut adalah grafik yang ditunjukkan oleh Gambar 11 merepresentasikan hasil pengujian skenario sistem 2 OOK-NRZ:



Gambar 11. Grafik BER OOK-NRZ.

5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis terhadap skenario pengujian yang dilakukan pada sistem komunikasi cahaya tampak bawah laut untuk komunikasi antar kapal selam, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

1. Dari hasil simulasi daya yang diterima terhadap jarak, semakin jauh jarak yang ditempuh dengan kedalaman yang semakin besar, maka daya yang diterima akan semakin kecil. Seperti pada kedalaman 5 m, dengan jarak minimum 1 m didapatkan daya sebesar 2.347×10^{-8} Watt, sedangkan nilai daya dengan jarak maksimum 10 m sebesar 1.658×10^{-8} Watt.
2. Dari hasil simulasi jangkauan komunikasi, teknik modulasi OOK-RZ lebih baik dibandingkan dengan OOK-NRZ. Hal ini dibuktikan dengan hasil simulasi OOK-RZ ketika jarak 7 m pada kedalaman 10 m memiliki nilai BER mencapai 5.207×10^{-3} , sedangkan untuk teknik modulasi OOK-NRZ ketika jarak 7 m pada kedalaman 10 m hanya mendapatkan nilai BER 3.526×10^{-2} .

DAFTAR PUSTAKA

- [1] L. U. Khan, "Visible light communication: Applications, architecture, standardization and research challenges," *Digital Communications and Networks*, vol. 3, no. 2, pp. 78–88, 2017.
- [2] H. Kaushal and G. Kaddoum, "Underwater optical wireless communication," *IEEE access*, vol. 4, pp. 1518–1547, 2016.
- [3] T. Szili, B. Matolcsy, and G. Fekete, "Water pollution investigations by underwater visible light communications," in *2015 17th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*. IEEE, 2015, pp. 1–4.
- [4] Z. Ahmad, P. Geisar, O. Salih, and S. Rajbhandari, "Design of a visible light communication system for deep sea divers based on analogue frequency modulation," in *2016 10th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP)*. IEEE, 2016, pp. 1–5.
- [5] Z. Ghassemlooy, W. Popoola, and S. Rajbhandari, *Optical wireless communications: system and channel modelling with Matlab R*. CRC press, 2019.
- [6] G. P. Agrawal, *Fiber-optic communication systems*. John Wiley & Sons, 2012, vol. 222.
- [7] C.-L. Liao, Y.-F. Chang, C.-L. Ho, M.-C. Wu, Y.-T. Hsieh, C.-Y. Li, M.-P. Houn, and C.-F. Yang, "Light-emitting diodes for visible light communication," in *2015 International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*. IEEE, 2015, pp. 665–667.
- [8] N. Chi, *LED-Based Visible Light Communications*. Springer, 2018.